

Vladimir Vetma, doktorand / Ph. D. student
Dr. sc. Zlatan Kulenović / Ph. D.
Dr. sc. Radovan Antonić / Ph. D.
 Sveučilište u Splitu / *University of Split*
 Pomorski fakultet / *Faculty of Maritime Studies*
 Zrinsko-frankopanska 38, 21000 Split
Dr. sc. Vinko Tomas / Ph. D.
 Pomorski fakultet u Rijeci /
Faculty of Maritime Studies Rijeka
 Studentska 2, 51000 Rijeka
 Hrvatska / *Croatia*

Pregledni članak
Review article

UDK / *UDC*:
 629.5.035.018.713

Primljeno / *Received*:
 16. listopada 2012. / *16th October 2012*
 Odobreno / *Accepted*:
 15. studenoga 2012. / *15th November 2012*

OPTIMIZIRANJE BRODSKOG VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM¹

OPTIMIZATION OF MARINE PROPELLERS WITH CONSTANT PITCH²

SAŽETAK

Brodski vijak kao propulzor važan je dio porivnog sustava broda. Odgovarajući odabir broskog vijka i njegovo redovito održavanje garancija su pouzdane, sigurne i ekonomične propulzije. U ovome radu prikazana je optimizacija broskog vijka s konstantnim usponom korištenjem sofisticirane Prop Scan tehnologije. Tehnologija omogućava ispitivanje kompletne geometrije vijka, dijagnosticiranje njegovih nepravilnosti, njihovo uklanjanje i modificiranje u svrhu postizanja što povoljnijih hidrodinamičkih značajki vijka. Najčešće se radi o korekciji uspona, pa se navedena tehnologija može nazivati i optimizacija uspona broskog vijka. Uklanjanje vibracija korekcijom uspona predstavlja ključan i možda najvažniji dio optimizacije vijka. Tako optimizirani vijak imat će učinkovitiju hidrodinamiku, bit će uravnotežen, ispravnog oblika te će odgovarati specifičnim zahtjevima broda uz poboljšanje izlaznih performansi broda. Na konkretnom primjeru dana je optimizacija vijka korekcijom uspona. Prikazani su rezultati ispitivanja i mjerenja geometrijskih, a time i hidrodinamičkih značajki broskog vijka s konstantnim usponom prije i nakon optimizacije. Utvrđena su poboljšanja izlaznih performansi broda. Smanjene su vibracije. Dizelski porivni motor je manje opterećen. Povećana je brzina broda uz smanjenje potrošnje goriva.

Ključne riječi: brodski vijak, optimizacija broskog vijka, uspon vijka, Prop Scan tehnologija

SUMMARY

The marine propeller is an important part of the ship's propulsion system. The appropriate selection of a marine propeller and its regular maintenance are a guarantee for a reliable, safe and economical propulsion. The paper presents the optimization of a marine propeller with constant pitch using sophisticated Prop Scan technology. This technology allows the complete examination of a propeller's geometry, a diagnosis of imperfections, their removal and modification in order to achieve more favourable hydrodynamic propeller characteristics. Usually, this concerns a correction of the pitch, so the above technology may be called an optimization of the marine propeller pitch. The removal of vibrations by correcting pitch represents an essential and perhaps the most important part of the propeller optimization. Thus, the optimized propeller will have more efficient hydrodynamics, will be balanced, of correct form, and will suit the specific requirements of the ship, alongside an improvement in the ship's output performance. The optimization of a propeller through correction of pitch is shown using a specific example. Examination and geometric measurement results are shown, as well as the hydrodynamic characteristics of marine propellers with constant pitch both before and after optimization. Enhancements in the ship's output performance were determined. Vibrations were reduced. The diesel propulsion engine was less loaded. The ship speed increased, while fuel consumption decreased.

Key words: marine propeller, marine propeller optimization, propeller pitch, Prop Scan technology

¹ Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta – Nove tehnologije u dijagnostici i upravljanju brodskih porivnih sustava, provedenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

² The results presented in the paper have been derived from the scientific project "New technologies in Diagnosis and Control of Marine Propulsion Systems" supported by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia.

1. UVOD

Optimizacija vijka konstantnog uspona pomoću Prop Scan tehnologije [5] nastala je iz potrebe postizanja pravilnog odnosa brod-vijak. Da bi se moglo pristupiti postupku optimizacije vijka prethodno je potrebno prikupiti osnovne podatke o brodu, pogonskom stroju i samom vijku. Postupak se sastoji od nekoliko koraka od kojih su najvažniji:

- početno ispitivanje i dijagnostika vijka (početni izvještaji u obliku linearnih i stupčanih dijagrama)
- proračun vijka pomoću sofisticiranih programa
- optimiziranje vijka prema proračunu vijka ili postupkom izjednačavanja vrijednosti uspona
- završno ispitivanje i dijagnostika vijka (završni izvještaji u obliku linearnih i stupčanih dijagrama)
- završno izvješće s usporedbom izlaznih performansi broda.

Optimiziranje vijka Prop Scan tehnologijom temelji se na korekciji uspona. Izmjereni usponi, a time i skenirani presjek lica krila vijka na određenom radijusu r uspoređuje se s podlogama ispravnog vijka povoljnih geometrijskih i hidrodinamičkih značajki za predmetni brod i njegov pogonski stroj. Podloga ispravnog vijka je presjek lica krila vijka na određenom radijusu r s takvom geometrijom, promjerom D i usponom P na koji je potrebno optimizirati vijak. Podloge stvara program za proračun vijka.

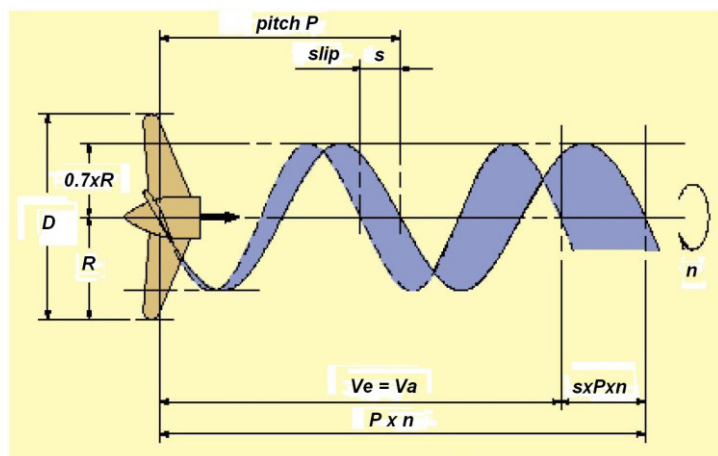
Osnovne geometrijske (promjer vijka D i uspon vijka P) i hidrodinamičke značajke vijka

1 INTRODUCTION

The optimization of marine propellers with constant pitch using Prop Scan technology [1] resulted from the need to achieve a proper balance between a ship and her propeller. In order to initiate procedures for propeller optimization, it is first necessary to collect the basic information of the ship, the main engine and the propeller itself. The procedure consists of a few steps, of which the most important are:

- initial testing and diagnosis of the propeller (initial report using linear and bar diagrams),
- propeller calculations using sophisticated programmes,
- optimization of the propeller according to propeller calculations or the procedure of equalizing pitch values,
- final testing and diagnosis of the propeller (final report using linear and bar diagrams), and
- final report with comparative performance outputs of the ship.

The optimization of the propeller using Prop Scan technology is based on pitch correction. The measured pitches and thus the scanned section of the propeller blade face at a certain radius r are compared to the basic set of correct propellers with favorable geometric and hydrodynamic characteristics for the ship in question and her main engine. The basic set for a correct propeller is the section of the propeller blade face at a certain radius r with such geometry, diameter D and pitch P where the propeller needs to be optimized. The basic sets are created by a programme for propeller calculations.



Slika 1. Osnovne geometrijske i hidrodinamičke značajke vijka
Figure 1 Basic geometric and hydrodynamic propeller characteristics

(brzina napredovanja vijka $v_e = v_a$) prikazane su na slici 1. [2].

Optimizirani vijak postiže se i bez proračuna vijka, postupkom izjednačavanja vrijednosti uspona. U tom se slučaju podloge novog dizajna lica krila vijka formiraju na osnovi izmjerenih uspona ispitivanog vijka i iskustva inženjera (stručnih osoba). Izmjerene točke prikazane na linearnim dijagramima početnog ispitivanja daju konture geometrije lica krila, s određenim odstupanjima koje je potrebno korigirati. Ispravljaju se nepravilnosti na površini lica krila te se time ispravljaju vrijednosti uspona na način da se njihove vrijednosti na istim mjernim točkama izjednačavaju. Iako se vrijednost uspona samo izjednačava, ne i mijenja (ako proračun vijka to traži), i ovakva optimizacija vijka daje poboljšane izlazne performanse broda, pogotovo smanjenje vibracija.

Vibracije su štetne za kompletan osovinski vod, pa i sam dizelski porivni motor. Mogu proizvesti različite kvarove. Stvaraju gubitke te se snaga pogonskog stroja P_B nepotrebno troši na njihovo svladavanje, umjesto na poriv broda. Upravo zbog te izgubljene snage, manja se snaga predaje vijku P_D , paje i snaga poriva P_T manja. Sve rezultira manjom silom poriva T i manjom brzinom broda v .

Iz navedene analize može se zaključiti da je za postizanje tražene brzine broda v , zbog problema s vibracijama, potrebno povećati snagu dizelskog motora na maksimum, ako razina vibracija to dopušta dizelskom motoru. To često uzrokuje nove probleme: preopterećenje dizelskog motora i povećanje potrošnje goriva b_e .

Preopterećenje dizelskog motora redovito je popraćeno nemogućnošću postizanja nominalnog broja okretaja n_{nom} . Ugroženo je granično radno područje dizelskog motora te dolazi do nepotpunog izgaranja (pojava gustog crnog dima na ispuhu). Uz sve to povećana je potrošnja goriva. Zbog svega navedenog, uslijed povećanih vibracija redovito se plovi s manjim brojevima okretaja motora.

Optimizacijom uspona lica krila vijka mogu se rješavati i ostali problemi, kao što su:

- rasterećenje dizelskog motora (prevelik broj okretaja dizelskog motora)
- zujanje vijka
- nesinkronizirani vijci (kada je slučaj s dva vijka)...

The basic geometric (propeller diameter D and propeller pitch P) and hydrodynamic propeller characteristics (speed of advance of the propeller through the wake $v_e = v_a$) are shown in Figure 1 [2].

An optimized propeller can also be achieved without propeller calculations, in a procedure that equalizes pitch values. In this case, the basic set for the new design of the propeller blade face are formed on the basis of measured pitches for the propeller being tested, as well as on the experience of the engineers (experts). The measured points shown on the linear diagrams of the initial testing show geometric contours of the blade face, with certain deviations which should be corrected. The irregularities on the surface of the blade face are corrected, which then corrects the pitch values so that their values are made equal at the same measured points. However, the pitch value is only made equal, not changed, even if the propeller calculations call for it. This kind of the propeller optimization gives improved outputs in the ship performance, particularly in reducing vibrations.

Vibrations are harmful to the entire shaft, even for diesel propulsion engines. They can cause various malfunctions. They create losses, so that the power of the main engine P_B is used unnecessarily on their control, instead of on propulsion. Precisely, and due to this loss of power, less power is transferred to the propeller P_D , so that the propulsion power of P_T is less. It all results in less force for the propulsion T and lower speed for the ship v .

For the above analysis, it can be concluded that, in order to reach the desired ship speed v , it is necessary to increase the power of the diesel propulsion engine to maximum due to vibration problems, if the vibration level allows the diesel propulsion engine to do so. Frequently, this creates new problems: overloading the diesel propulsion engine and increasing the fuel consumption b_e .

Overloading the diesel propulsion engine is regularly followed by the impossibility of achieving a nominal number of engine revolutions n_{nom} . The working limits of the diesel propulsion engine are tested, and an incomplete combustion occurs (the appearance of thick, black smoke at the exhaust). Alongside this, the fuel consumption increases. Due to all of the above, diesel propulsion engines show a lower number of revolutions when a ship sails.

The optimization of the blade face's pitch can also resolve other issues, such as:

2. OPTIMIZACIJA VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM POMOĆU PROP SCAN TEHNOLOGIJE

Korištenjem Prop Scan tehnologije omogućen je popravak, modifikacija i optimizacija vijaka svih vrsta brodova. Optimizacija vijaka vrši se prema najvišem međunarodnom standardu za brodogradnju i brodske vijke ISO 484 (ISO 484/1 i ISO 484/2) s tolerancijama točnosti izrade vijaka iz 1981. godine.¹

Klase točnosti vijka prema ISO 484/2 postižu se podešavanjem i optimiziranjem geometrijskih značajki vijka koje se odnose na uspon P , a time i na omjer uspona P/D . U tablici 1. prikazane su dopuštene ISO tolerancije s obzirom na uspon P , a unutar klasa točnosti izrade vijka.

Prop Scan sustav za ispitivanje i dijagnostiku vijaka prikazan je na slici 2. Sustav se sastoji od radnog stola s postoljem za vijak, te od kрана s mjernom šipkom i senzorom. Mjerna šipka sa senzorom prelazi preko lica krila vijka u smjeru od ulaznog prema izlaznom bridu po označenim radijusima. Senzori prikupljaju podatke s lica krila za svaki stupanj okretaja vijka na postolju radnog stola i te podatke šalju u računalo.

Drugi dio Prop Scan sustava sastoji se od računala opremljenog programima koji obrađuju primljene podatke. Rezultati mjerenja prikazuju se na ekranu računala. Mjerenje se obavlja okretanjem vijka na postolju za 360°, što odgovara vrijednosti jednog punog uspona. Radijusi se ocrtavaju na način da se na mjerenoj šipki prethodno postavi šiljak za označavanje radijusa zakretanjem vijka na postolju radnoga stola. Tipični označeni radijusi su: $r = 0,3 \cdot R$, $r = 0,4 \cdot R$, $r = 0,5 \cdot R$, $r = 0,6 \cdot R$, $r = 0,7 \cdot R$, $r = 0,8 \cdot R$, $r = 0,9 \cdot R$, $r = 0,95 \cdot R$ (vrh krila), gdje je R radijus vijka.

Rezultati mjerenja prikazuju se kao izvještaji u obliku linearnih i stupčanih dijagrama. Dobiiveni rezultati su izmjerene vrijednosti uspona za jedan puni okretaj vijka (360°) na određenom radijusu. Računalo registrira i pohranjuje izmjerene vrijednosti. S obzirom na broj mjernih mjesta na tom radijusu (u nastavku mjerne

- unloading of diesel propulsion engines (number of revolutions are too high for diesel propulsion engines),
- buzzing propellers,
- unsynchronized propellers (concerning two propellers), ...

2 OPTIMIZATION OF SHIP PROPELLERS WITH CONSTANT PITCH USING PROP SCAN TECHNOLOGY

The use of Prop Scan technology enables the repair, modification and optimization of propellers for all kinds of ships. The optimization of propellers is carried out according to the highest international standards for shipbuilding and marine propellers, ISO 484 (ISO 484/1 and ISO 484/2), with manufacturing accuracy tolerances for marine propellers dating back to 1981¹.

The accuracy class for propellers, according to ISO 484/2, is achieved by adjusting and optimizing the geometric characteristics of a propeller that concern pitch P , and accordingly the pitch ratio P/D . Table 1 shows the allowed ISO tolerance according to pitch P within the accuracy classes for the manufacture of marine propellers.

The Prop Scan system for the testing and diagnostics of propellers is shown in Figure 2. The system is made up of a work bench with a base for the propeller, and a crane with a measuring rod and sensor. The measuring rod with sensor extends over the propeller blade face going from the leading to the trailing edge according to the marked radii. The sensors gather information from the blade face for each degree of the propeller rotation on the base of the work bench, sending the data to the computer.

The second part of the Prop Scan system consists of a computer equipped with programmes that analyze the data received. The measurement results are shown on the computer screen. The measurement is carried out by turning the propeller on the work base by 360°, which is the equivalent value of one complete pitch. Radii are marked by first placing a radius labelling spike on the measurement rod by

¹ Standard ISO 484 obuhvaća postupak izrade (odljevc, završna obrada), kao i specifikaciju opreme koja se može koristiti za izradu vijaka. ISO 484/2 odnosi se na vijke promjera od 800 mm do 2500 mm, dok se ISO 484/1 odnosi na vijke promjera većeg od 2500 mm [5].

¹ Standard ISO 484 encompasses the manufacturing procedure (castings, finishing), as well as the specification of equipment that can be used for the manufacture of propellers. ISO 484/2 concerns propellers with diameters from 800 mm to 2500 mm, while ISO 484/1 concerns propellers with diameters greater than 2500 mm [1].

Tablica 1. Dopuštene ISO 484/2 tolerancije s obzirom na uspon P
Table 1 Allowed ISO 484/2 tolerances in relation to pitch P

USPON / <i>PITCH</i>			Klasa / <i>Class</i>			
			S	I.	II.	III.
1	Lokalni uspon <i>Local pitch</i>	Uspon jednog dijela presjeka krila <i>Pitch of a section part</i>	$\pm 1.5\%$ 10 mm	$\pm 2.0\%$ 15 mm	$\pm 3.0\%$ 20 mm	-
2	Uspon presjeka <i>Section pitch</i>	Uspon na jednom radijusu krila <i>Pitch of a single-blade radius</i>	$\pm 1.0\%$ 7.5 mm	$\pm 1.5\%$ 10 mm	$\pm 2.0\%$ 15 mm	$\pm 5.0\%$ 20 mm
3	Uspon krila <i>Blade pitch</i>	Uspon jednog krila <i>Pitch of a single blade</i>	$\pm 0.75\%$ 5 mm	$\pm 1.0\%$ 7.5 mm	$\pm 1.5\%$ 10 mm	$\pm 4.0\%$ 20 mm
4	Uspon vijka <i>Propeller pitch</i>	Srednji uspon svih krila <i>Average pitch of all blades</i>	$\pm 0.5\%$ 4 mm	$\pm 0.75\%$ 5 mm	$\pm 1.0\%$ 7.5 mm	$\pm 3.0\%$ 15 mm

točke), formira se i sam presjek lica krila s oblikom i izgledom površine lica. Zbog toga linearni dijagrami (vidi poglavlje 4) predstavljaju izvornu presliku oblika i izgleda površine lica krila vijka na skeniranom radijusu. Vrijednost uspona na ulaznom bridu lica krila na početku svakog mjerenja je 0.

Prop Scan tehnologija bazirana je na ispitivanju uspona vijka, pa se i rezultati mjerenja koriste za njegovu analizu što omogućuje daljnja poboljšanja standarda ISO 484. Prop Scan sustav ima široku paletu uskospecijaliziranih programa koji omogućuju određivanje geometrij-

turning the propeller on the base of the work bench. Typically, radii are: $r = 0.3 \cdot R$, $r = 0.4 \cdot R$, $r = 0.5 \cdot R$, $r = 0.6 \cdot R$, $r = 0.7 \cdot R$, $r = 0.8 \cdot R$, $r = 0.9 \cdot R$, $r = 0.95 \cdot R$ (blade tip), where R is the radius of the propeller.

The measurement results are shown as linear and bar diagram reports. The results obtained are the measured pitch values for a complete propeller rotation (360°) at a certain radius. The computer registers and stores the measured values. Considering the number of measuring points on this radius (after the measuring points), a section of the blade face itself is formed with the actual shape and appearance



Slika 2. Prop Scan sustav za ispitivanje vijka
Figure 2 Prop Scan system for testing propellers

skih i hidrodinamičkih značajki vijaka sa svrhom postizanja najpovoljnijeg ukupnog stupnja iskoristivosti propulzije η_p . Sa svim svojim programskim rješenjima Prop Scan tehnologija postavlja nove standarde kvalitete optimizacije i nove klase točnosti izrade brodskih vijaka.

3. POBOLJŠANJA STANDARDA ISO 484

Prop Scan sustav za ispitivanje i dijagnostiku vijaka omogućava daljnja poboljšanja unutar standarda ISO 484/1 i ISO 484/2. Tako je razvijen Poboljšani standard vijka (Prop Scan EPS – Enhanced Propeller Standard) [5] s ciljem što kvalitetnijeg popravka, modifikacije i optimizacije vijka, ali i dalje strogo poštivajući međunarodne standarde ISO 484/1 i ISO 484/2. Prop Scan EPS je standard dodatne kvalitete vijka.

Zahvaljujući modernoj Prop Scan tehnologiji, te uvedenom standardu Prop Scan EPS omogućeno je:

- mjerenje i usporedba uspona za svaki stupanj okretaja vijka
- potpunost mjerenja kako velikih, tako i malih vijaka
- dodatne klase točnosti izrade vijaka, dodatno smanjenje dopuštenih ISO tolerancija (klasa 0 – polovina dopuštenih ISO tolerancija klase S te klasa N – bez pogreške, idealno).

Mjerenjem vijka za svaki stupanj okretaja rezultira kompletno skeniranom licu krila. Tabli-

of the surface. For this reason, the linear diagrams (see Chapter 4) represent an original copy of the shape and appearance of the propeller blade surface at the scanned radius. The pitch value at the leading edge of the blade face is 0 for each measurement.

The Prop Scan technology is based on the analysis of the propeller pitch, so that the measurement results are used in this analysis. This enables further improvements on the ISO 484 standard. The Prop Scan system has a broad spectrum of narrowly specialized programmes that permit the assessment of geometric and hydrodynamic propeller characteristics in order to achieve the best overall level of propulsion efficiency η_p . The Prop Scan technology, with all its programme solutions, sets new standards for the quality optimization and new accuracy classes in the manufacture of marine propellers.

3 ENHANCEMENTS OF THE ISO 484 STANDARD

The Prop Scan system for the testing and diagnostics of propellers enables a further improvement within the ISO 484/1 and ISO 484/2 standards. This developed the Enhanced Propeller Standard (Prop Scan EPS) [5] with the aim of achieving the best repair, modification and optimization of propellers, keeping in line with the strict international ISO 484/1 and ISO 484/2 standards. The Prop Scan EPS is a standard for the additional propeller quality.

Thanks to modern Prop Scan technology, and the introduction of the Prop Scan EPS standard, the following is possible:

Tablica 2. Usporedba mjerenja sukladno Prop Scan EPS i ISO 484/2

Table 2 Comparison of measurements using the Prop Scan EPS and ISO 484/2 standards

Prop Scan EPS u odnosu na ISO 484/2 / Prop Scan EPS compared to ISO 484/2				
	EPS lice krila / EPS blade face		ISO 484/2 lice krila / ISO 484/2 blade face	
Klasa Class	Broj mjerenja Number of measurements	Lokalni uspon Local pitch	Broj mjerenja Number of measurements	Lokalni uspon Local pitch
0	57	4	0	0
S	57	4	5	4
I.	57	3	4	3
II.	57	2	3	2
III.	57	2	2	-
Kut krila vijka između ulaznog i izlaznog brida je prosječno 57° The angle of propeller blades between the leading to trailing edge is on average 57°				

ca 2. prikazuje prednosti mjerenja Prop Scan tehnologijom sukladno standardu Prop Scan EPS u odnosu na mjerenja sukladno standardu ISO 484/2.

Mjerenje sukladno Prop Scan EPS obavlja se prosječno na 57 mjesta po svakom presjeku lica krila te predstavlja dodatak mjerenju prema ISO 484/2. Ovakvo mjerenje ili skeniranje vijka omogućuje istraživanje kompletnog presjeka lica krila. Prije to nije bilo moguće, jer su se sukladno ISO 484/2 mjerile samo ulazne i izlazne točke (vidi broj mjerenja sukladno ISO 484/2 utablici 2.), a sve u funkciji izračuna uspona, što je u biti i nedostatak mjerenja sukladno ISO 484/2, jer veliko područje površine lica krila ostaje neistraženo. Prop Scan tehnologija upravo je nastala zbog sve većih zahtjeva potrebne preciznosti izrade vijaka za potrebe ratne mornarice.

Prema Prop Scan EPS vijak se mjeri i skenira na 4 do 8 (max. 10) određenih radijusa krila vijka ovisno o klasi na koju se optimizira (Tablica 3). Na odabranom broju radijusa krila vijka mjeri se i skenira svaki presjek lica krila vijka i to, kako je već objašnjeno, do 57 mjesta po svakom presjeku krila. Svaki presjek lica krila koji se mjeri i skenira podijeljen je na sekcije, tzv. lokalna područja (Slika 3). Broj lokalnih područja (lokalni uspon) je od 2 do 4 (Tablica 2). Ovo znači, da se na jednom krilu vijka izvede do 570 mjerenja te se s obzirom na toliki broj mjernih točaka dobiva potpuno skenirana površina lica krila. Kako je Prop Scan sustav za ispitivanje vijka baziran na mjerenju uspona, to se i optimiziranje vijka bazira na korekciji uspona.

Ovakav način preciznog mjerenja kojim se dobiva skenirana površina lica krila omogućuje nam da se uvjerimo u kakvom je stanju vijak. Sve do danas se nagađalo s popravcima na površini lica krila, a upravo ta površina je radna. Sada, nakon snimanja lica krila, ovlaštene oso-

- measuring and comparison of the pitch for each degree of the propeller rotation,
- complete measurement of large and small propellers,
- additional accuracy classes for the manufacture of propellers, additional lowering of the allowed ISO tolerances (class 0 - half of the allowed ISO tolerances for the S class, and N class - no error, ideal).

Measuring the propeller for each degree of the rotation results in complete scans of the blade face. Table 2 shows the advantages of measuring using the Prop Scan technology according to the Prop Scan EPS standards in relation to measurements using the ISO 484/2 standard.

Measurements according to the Prop Scan EPS are carried out at 57 points on average for each section of the blade face, representing additional measurements according to the ISO 484/2 standard. Such measurements or scanning of propellers enables the testing of a complete section of the blade face. This was not possible before, as according to the ISO 484/2 standard, only the entry and exit points were measured (see the number of measurements according to ISO 484/2 in Table 2), all for the purpose of calculating pitch. In essence, this is the flaw of measuring using the ISO 484/2 standard, as a large area of the blade face remains unexplored. The Prop Scan technology appeared precisely due to the growing demands of the navy for precision in the manufacture of propellers.

According to the Prop Scan EPS, propellers are measured and scanned at 4 to 8 (max. 10) set radii of the propeller blades depending on the class of optimization (Table 3). At the set numbers of radii, sections of blade faces are measured and scanned up to 57 points for each blade section, as already mentioned. Each part of the blade face that is measured and scanned is divided into sections, the so-called local area (Figure 3). The number of local areas (local pitch) is from 2 to 4 (Table 2). This means that

Tablica 3. Prop Scan EPS broj mjerenih radijusa
Table 3 Prop Scan EPS number of measured radii

Klasa <i>Class</i>	Mjereni radijusi <i>Measured radii</i>	Broj radijusa <i>Number of radii</i>	Prihvaćena isključenja <i>Accepted exclusions</i>
0	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95	8	2
S	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95	8	2
I.	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9	7	2
II.	0.3, 0.5, 0.7, 0.9	4	1
III.	0.3, 0.5, 0.7, 0.9	4	1



Slika 3. Mjerna područja lica krila vijka ribarskog broda

Figure 3 Measurement areas of the propeller blade face for a fishing ship

be projektiraju na osnovi rezultata dobivenih proračunom vijka te stvaraju novi dizajn lica krila vijka koji se popravljaju. Često se radi i o vijcima koji su tek izašli iz tvornice.

Mjerenjem presjeka, odnosno lica profila vijka na odabranom radijusu vijka možemo dobiti vrijednosti o lokalnom usponu i usponu presjeka (lica profila).

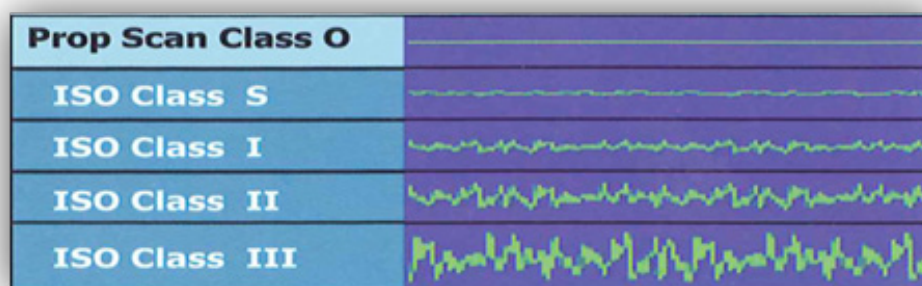
Mjerenjem presjeka, odnosno lica profila vijka na za to odabranom broju radijusa vijka prema tablici 3., dobit će se vrijednosti za uspon krila i uspon vijka.

Prihvaćena isključenja prikazana u tablici 3. predstavljaju dopušteni umanjeni broj mjerenih radijusa prema Prop Scan EPS. Ovisno o klasi točnosti na koju se podešava vijak, vrši se korekcija izmjerenih vrijednosti za uspon vijka. Prop Scan omogućuje precizno mjerenje uspona do točnosti od 0,025 mm.

up to 570 measurements are carried out on one propeller blade, and considering the large number of measuring points, a complete scan of the blade face is obtained. As the Prop Scan system for testing propellers is based on measuring pitch, then the optimization of the propeller is based on the correction of pitch.

This method of a precise measurement that is obtained by scanning the blade surface gives us an insight into the actual state of the propeller. Up until today, estimates were made concerning repairs to the blade face, which is the actual work surface. Now, after scanning the blade face, authorized personnel can project new results obtained through propeller calculations, creating a new design for the propeller blade face to be repaired. Frequently, this concerns propellers that have just been released from production.

Measuring a propeller blade face section or propeller face profiles at chosen propeller radii,



Slika 4. Smanjenje vibracija za različite ISO 484/2 klase točnosti vijka

Figure 4 Lowering vibrations for various ISO 484/2 propeller accuracy classes

Skeniranjem presjeka, odnosno lica profila vijka na odabranom radijusu vijka možemo vidjeti netočnosti u usponu i netočnosti u konveksnosti i obliku presjeka krila vijka. Ove netočnosti uzrokuju nepravilan rad vijka, uslijed čega nastaju vibracije na krmenom dijelu broda koje se prenose na osovinski vod te kavitacija na samom vijku.

Prop Scan sustav za ispitivanje vijaka omogućava dijagnosticiranje navedenih netočnosti na vijku te njihovo uklanjanje, modificiranje i optimiziranje. Uklanjanje vibracija predstavlja ključan, pa čak i najvažniji dio optimizacije vijka kako bi se poboljšale izlazne performanse broda, a to su: smanjenje vibracija, smanjenje preopterećenja dizelskog motora, povećanje broja okretaja dizelskog motora za određenu radnu točku, sprječavanje nastanka kavitacije vijka, povećanje brzine broda, smanjenje potrošnje goriva.

Na slici 4. prikazan je vizualni odnos jačine vibracija za različite klase točnosti vijka. Svi vijci bez oštećenja su većinom klase točnosti III., proizvode se s klasom točnosti II., dok su vijci visoke klase točnosti I. i S rijetkost. Takvi vijci stvaraju najmanje vibracije.

Nakon provedene dijagnostike, potrebno je izvršiti određene preinake na vijku, odnosno potrebno je izvršiti korekciju uspona prema podlogama novog dizajna lica krila vijka (linerni dijagrami).

Korekcija uspona obavlja se mehaničkim putem (udarci čekićima raznih veličina i težina, hidrauličnim presama, stegama, lancima) te zagrijavanjem, argonskim varenjem, brušenjem, balansiranjem i završnom obradom. Brušenjem i završnom obradom površina lica krila mora biti ulaštena i glatka kako bi osigurala miran rad vijka, osovinskog voda i dizelskog motora, bez većih vibracija, a samim time i oštećenja. Gubici su manji, a stupanj iskoristivosti vijka η_0 je veći. Glatka površina vijka stvara manji otpor, vijak lakše radi, lakše "siječe" more, pa se smanjuje i mogućnost pojave kavitacije i erozije krila vijka.

Najvažnije pravilo korekcije je postići jednake vrijednosti uspona na istim mjernim točkama svakog krila vijka. Takav vijak ima jednolik i balansiran rad, bez proklizavanja i bez vibracija, a to je bit optimizacije vijka.

Često je zboga ovakvih problema s nejednolikim usponom potrebno korigirati i tek proizve-

we can obtain values on local pitch and section pitch (face profile).

Measuring a propeller blade face section or propeller face profiles at a set number of propeller radii according to Table 3 shows values for blade pitch and propeller pitch.

The accepted exclusions shown in Table 3 represent the allowed drop in the number of measured radii according to the Prop Scan EPS. Depending on the accuracy class of the propeller being fitted, a correction of the measured values for propeller pitch is carried out. The Prop Scan allows for precise pitch measurements for accuracies starting from 0.025 mm.

Scanning a propeller blade face section or propeller face profiles at set propeller radii, we can see pitch inaccuracies and inaccuracies in convexity and shape of the propeller blade section. These inaccuracies cause irregular propeller motion, which results in vibrations in the stern region of the ship that is transferred to the shaft and cavitation on the propeller itself.

The Prop Scan system for testing propellers enables a diagnosis of irregularities on propellers, its removal, modification and optimization. The removal of vibrations represents the key, and even the most important part of the propeller optimization, in order to improve a ship's output performance, for instance: lowering vibrations, reducing the overload on diesel propulsion engines, increasing the number of revolutions for diesel propulsion engines at ascertain working point, preventing propeller cavitation, increasing the ship's speed, decreasing fuel consumption...

Figure 4 shows the visual relationship of vibration strengths for various propeller accuracy classes. All undamaged propellers fall mostly under accuracy class III, they are manufactured under accuracy class II, while propellers under the high accuracy class I and S are rare. Such propellers create the lowest vibrations.

After carrying out the diagnostics, certain changes to the propeller must be made, or rather a pitch correction must be done according to the base set of the propeller blade's face new design (linear diagram).

The pitch correction is carried out mechanically (using hammers of various sizes and weights, hydraulic presses, constraints, chains), as well as heating, argon welding, grinding, balancing and final finish. The grinding and final finish must ensure shiny and smooth blade faces, in order to ensure quiet propeller, shaft and

Tablica 4. Srednje povećanje brzine i srednja ušteda goriva broda za različite ISO 484/2 klase točnosti vijka
Table 4 Average speed increase and average fuel savings for a ship with various ISO 484/2 propeller accuracy classes

Klasa Classes		Srednje povećanje brzine i srednja ušteda potrošnje goriva Average speed increase and average fuel consumption savings			
Prop Scan / Prop Scan	0	1 – 5%	5 – 10%	10 – 15%	15 – 20%
ISO 484/2	S				
	I.				
	II.				
	III.				

dene vijke. Vijci se proizvode serijski prema ISO klasama točnosti, ali imaju svoje početničke pogreške (Tablica 2). Uz to, kada se ugrade na brod, nastaju i drugi problemi. Tada se rade prilagodbe i modifikacije za što povoljniji odnos brod-vijak. Ostvarenjem tog odnosa, postižu se optimalne izlazne performanse broda, pa takav vijak zovemo optimalnim ili savršenim vijkom za taj brod.

Korekcije uspona na više klase točnosti prema ISO 484/2, rezultiraju boljem vijku, što se može zaključiti iz tablice 4. koja je nastala na temelju rezultata izlaznih performansi broda na probnim vožnjama nakon optimizacija na različite klase točnosti vijka.

Postupak korekcije vijka s kontrolnim mjerenjima na Prop Scan sustavu za ispitivanje, ponavlja se toliko puta, dok se korigirana mjesta uspona ne približe optimalnima unutar tolerancija klase točnosti vijka na koju se vijak optimizira, i koja se zahtijeva. Dopuštene tolerancije za određenu ISO klasu točnosti vijka, prikazane su u dijagramima (poglavlje 4) sa žutim isprekidanim pravokutnicima, područje tolerancija (tolerance band). Unutar područja tolerancija za određenu ISO klasu točnosti vijka, potrebno je optimizirati vijak.

4. PRIMJER OPTIMIZACIJE VIJKA S KONSTANTNIM USPONOM POMOĆU PROP SCAN TEHNOLOGIJE

U nastavku rada prikazan je sažeti metodološko-tehnološki postupak optimizacije vijka, na primjeru ribarskog broda “Majka Marija” – Šibenik, vlasnika gosp. Fredija Popova iz Tribunj. Obuhvaćeno je početno i završno ispitivanje s usporedbom najvažnijih geometrijskih

diesel propulsion engine operation, without major vibrations, and, therefore, without damages. The losses are lower, and the level of propeller efficiency η_0 is greater. The smooth propeller surface creates less resistance, the propeller operates and cuts through the sea easier, so that the potential appearance of propeller blade cavitation and erosion is reduced.

The most important rule for correction is to achieve equal pitch values at the same measuring points of each propeller blade. Such a propeller operates uniformly and with balance, without slip and without vibrations, which is the essence of the propeller optimization. Frequently, due to such problems as with unequal pitch, it is necessary to correct recently released propellers. Propellers are manufactured in series according to ISO accuracy classes, but they have their production errors (Table 2). Furthermore, other problems appear when they are built into a ship. Then adjustments and modifications are made so as to achieve the best possible ship - propeller relationship. When this is achieved, the ship's optimal output performance is reached, so that we call such a propeller an optimal or perfect propeller for this ship.

The pitch correction on a number of accuracy classes according to ISO 484/2, results in a better propeller. This can be concluded from Table 4, based on the results of a ship's output performance during test rides after optimization at various propeller accuracy classes.

The procedure for the propeller correction with controlled measurements on the Prop Scan testing system is repeated continuously until the corrected pitch places approach the optimal ones within the tolerance limits of the propeller accuracy class for which the propeller is being optimized, and which is required. The allowed tolerance limits for certain ISO propeller accuracy classes are shown in diagrams (Chapter 4) shaped as discontinuous rectangles, the tolerance band. Within the tolerance

značajki vijka. Zaključno je iznijeta usporedba izlaznih performansi broda. Optimiziranje vijka obavlja se postupkom izjednačavanja vrijednosti uspona. Prethodno su dani osnovni podaci o brodu, pogonskom stroju i vijku. Brzina ribarskog broda: $v = 12$ čv (6.173 m/s).

Osnovni podaci ribarskog broda “Majka Marija” su [8]:

$L_{OA} = L = 18,34$ m – dužina preko svega

$L_{PP} = 14,40$ m – dužina između okomica

$B = 4,60$ m – širina

$B_{max} = 4,72$ m – širina maksimalna

$H = 2,00$ m – visina

$T = 1,60$ m – gaz

$T_K = 2,50$ m – gaz krme

$T_P = 1,80$ m – gaz prove

$T_{max} = 1,85$ m – gaz maksimalni

Istisnina (težina) $G = 50$ t

Istisnina (volumen) $V = 48,73$ m³

Materijal gradnje ribarskog broda je drvo.

Pogonski stroj ribarskog broda je brzohodni dizelski motor tipa WM 1312 H. Radi se o V motoru s 12 cilindara. Osnovni podaci brzohodnog dizelskog motora WM 1312 H [9]:

- $P_B = 242,71$ kW
- $n_m = 180$ min⁻¹
- prijenosni omjer reduktora: $i = 5 : 1$.

Propulzor ribarskog broda “Majka Marija” je četverokrakli vijak s konstantnim usponom talijanskog proizvođača Eliche Radice [10]. Oznaka na glavini vijka je Eliche Radice B6.

Radi se o vijku specijalno prilagođenom za ribarske brodove, izrađenom iz legure bronce, klase točnosti II., sljedećih tvorničkih značajki:

- promjer vijka: $D = 1400$ mm
- uspon vijka: $P/D_{max} = 0,9$
- omjer površina vijka: $A_E/A_O = 0,568$.

Prije ispitivanja na vijku je izvršena mala korekcija promjera za 20 mm, pa je $D = 1380$ mm. Razlog su oštećenja koje je vijak imao na vršcima presjeka, profila krila.

Optimizacija vijka Eliche Radice B6 ribarskog broda “Majka Marija” radi se iz klase točnosti vijka II. na klasu točnosti vijka S, što je prema ISO 484/2 standardu vrlo visoka klasa točnosti.

band for the set ISO propeller accuracy class, the propeller must be optimized.

4 AN EXAMPLE OF PROPELLER OPTIMIZATION WITH CONSTANT PITCH USING PROPSCAN TECHNOLOGY

The paper continues by showing a condensed methodological and technological procedure for propeller optimization, using the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship from Šibenik as an example, whose owner is Mr. Freddy Popov from Tribun. It entails initial and final testing with a comparison of the most important geometric propeller characteristics. In conclusion, a comparison of the ship’s output performances are given. The propeller optimization is a procedure that equalizes pitch values. The basic ship’s data, main engine and propeller are given first. The speed of the fishing ship: $v = 12$ kts (6.173 m/s).

Basic data on the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship [8]:

$L_{OA} = L = 18.34$ m – overall length

$L_{PP} = 14.40$ m – length between perpendiculars

$B = 4.60$ m – beam

$B_{max} = 4.72$ m – maximum beam

$H = 2.00$ m – height

$T = 1.60$ m – draft

$T_K = 2.50$ m – the draft aft (stern)

$T_P = 1.80$ m – the draft forward (bow)

$T_{max} = 1.85$ m – maximum draft

Displacement (weight) $G = 50$ t

Displacement (volume) $V = 48.73$ m³

The construction material for the fishing ship is wood.

The main engine for the fishing ship is a high speed diesel engine type WM 1312 H. It is a V motor with 12 cylinders. The basic data for the high speed diesel engine WM 1312 H [9]:

- $P_B = 242.71$ kW,
- $n_m = 1800$ min⁻¹,
- the gear ratio: $i = 5 : 1$.

The propulsion for the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship is a 4-blade propeller with constant pitch by the Italian manufacturer ELICHE RADICE [10]. The propeller is marked ELICHE RADICE B6.

Dopuštene tolerancije za klasu točnosti S prikazane su u obliku žutih isprekidanih pravokutnika, područja tolerancija (tolerance band) u dijagramima početnog i završnog ispitivanja te iznose:

- $\pm 1,5\%$ za devijaciju
- $- 1,5\%$ za diferenciju
- $\pm 2,3\%$ za sumu.

Na kraju ispitivanja i mjerenja vijka B6, stupčanim dijagramima prikazano je stanje vijka prije (Slika 9) i nakon (Slika 14) optimizacije. Radi se o dijagramima kojima su pregledno obuhvaćene/a:

- srednje vrijednosti uspona presjeka za krilo 1, 2, 3 i 4 na svim radijusima
- srednje vrijednosti uspona krila 1, 2, 3, i 4
- srednja vrijednost uspona vijka

i njihova odstupanja od optimalnih vrijednosti, koje su unutar dopuštenih tolerancija točnosti izrade vijka za klasu S prema međunarodnom standardu ISO 484/2.

4.1. Početno ispitivanje i dijagnostika vijka

Na slici 5. prikazan je postupak mjerenja vijka tipa B6 Eliche Radice Prop Scan tehnologijom [1].

Rezultati mjerenja vijka tipa B6 Eliche Radice prikazani su kao početni izvještaji u obliku linearnih dijagrama. Mjerne točke krila 1, 2, 3, 4 na radijusima $r = 0,3 \cdot R$, $r = 0,4 \cdot R$, $r = 0,5 \cdot R$, $r = 0,6 \cdot R$, $r = 0,7 \cdot R$, $r = 0,8 \cdot R$, $r = 0,9 \cdot R$, $r = 0,95 \cdot R$ (vrh krila), formiraju oblik i izgled lica krila sa svim odstupanjima od optimalnog vijka. Izmjerene vrijednosti mjernih točaka predstavljaju uspon, uspon za ispitivanje, dijagnostiku i daljnu analizu vijka.

U daljnjem tekstu: krilo 1 – krilo prvo, krilo 2 – krilo drugo, krilo 3 – krilo treće, i krilo 4 – krilo četvrto. Rezultati mjerenja prikazani u dijagramima označeni s: 1 su za lice krila 1, 2 su za lice krila 2, 3 su za lice krila 3 i 4 su za lice krila 4. Oznake na dijagramima su: *mv* za izmjerene vrijednosti, *ov* za optimalne vrijednosti, *lp* za vrijednost lokalnog uspona, *msp* za izmjerenu vrijednost uspona presjeka, *mmsp* za srednju vrijednost izmjerenih uspona presjeka *msp*, i *osp* za vrijednost optimalnog uspona presjeka.

This is a propeller specially adapted for fishing ships, made from a bronze alloy, accuracy class II, with the following factory characteristics:

- propeller diameter: $D = 1400$ mm,
- propeller pitch: $P/D_{max} = 0.9$,
- propeller surface ratio: $A_E/A_O = 0.568$.

A small correction was carried out on the propeller before examination, where the diameter was decreased by 20 mm, so that now $D = 1380$ mm. The reason for this were the damages sustained by the propeller at the section tips, blade profile.

A ELICHE RADICE B6 propeller optimization of the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship was carried out under the propeller accuracy class II for a propeller accuracy class S, which is a very high accuracy class under the ISO 484/2 standard.

The allowed tolerances for the accuracy class S are shown in the shape of discontinuous rectangles, the tolerance band in the initial and final testing diagrams, amounting to:

- $\pm 1.5\%$ for deviation,
- 1.5% for differentiation, and
- $\pm 2.3\%$ for the sum.

At the end of testing and measuring the propeller B6, the bar diagrams show the state of the propeller before (Figure 9) and after (Figure 14) optimization. These are diagrams that clearly cover:

- mean section pitch values for blades 1, 2, 3 and 4 at all radii,
- mean blade pitch values for blades 1, 2, 3, and 4,
- mean propeller pitch values,

and their deviation from optimal values, which are within the allowed tolerance limits for the manufacturing of propeller accuracy class S according to the international ISO 484/2 standard.

4.1 Initial Testing and Diagnosis of the Propeller

Figure 5 shows the procedure for measuring a propeller type B6 ELICHE RADICE using the Prop Scan technology [1].

The results from measuring a propeller type B6 ELICHE RADICE are shown as an initial report in the shape of linear diagrams. The measurement points of blades 1, 2, 3, 4 at radii $r = 0.3 \cdot R$, $r = 0.4 \cdot R$, $r = 0.5 \cdot R$, $r = 0.6 \cdot R$, $r = 0.7 \cdot R$, $r = 0.8 \cdot R$, $r = 0.9 \cdot R$, $r = 0.95 \cdot R$ (blade

Podloge uspona lica krila optimalnog vijka označene su točkastim linijama. One predstavljaju novi dizajn lica krila vijka. Ovim radom prikazana je optimizacija postojeće geometrije lica krila na način da se ispravljaju sve površinske nepravilnosti lica krila, a samim time i vrijednosti uspona. Prema tome, vrijednosti optimalnih uspona rezultat su korigiranih nepravilnosti na površinama lica krila vijka tipa B6 Eliche Radice ribarskog broda “Majka Marija”, a ne rezultat proračuna vijka. Međutim, i ovakva optimizacija uspona daje poboljšane izlazne performanse broda.

Prikazane vrijednosti rezultata mjerenja predstavljaju srednju vrijednost lokalnog uspona za svako od 4 lokalna područja lica krila na istom radijusu lp . Srednje vrijednosti uspona za optimalni vijak ov i osp također su prikazane u dijagramima. Na linearnom dijagramu su i srednje vrijednosti uspona presjeka lica krila 1, 2, 3, 4 na istom radijusu mnp , kao i srednja vrijednost uspona sva 4 krila na istom radijusu $mmnp$. Tu je i vrijednost kuta krila φ , za određeni radijus.

Početni izvještaj u obliku linearnog dijagrama nakon početnog mjerenja lokalnog uspona i uspona presjeka krila 1, 2, 3, 4 vijka B6 na radijusu $r = 0,95 \cdot R$ prikazan je na slici 6.

Linearni dijagrami nakon početnog mjerenja su dijagnoza ili nalaz stanja vijka prije optimizacije. Najveća odstupanja uspona lica krila od optimalnoga su baš na radnoj, efektivnoj povr-

tip), form the shape and appearance of the blade face with all the deviations from the optimal propeller. The measured values of the measurement points represent pitch, pitch for testing and diagnostic, and further propeller analysis.

In the text that follows: blade 1 is the 1st blade, blade 2 is the 2nd blade, blade 3 is the 3rd blade, and blade 4 is the 4th blade. The measurement results shown in the diagrams labeled with: 1 for the 1st blade face, 2 for the 2nd blade face, 3 for the 3rd blade face, and 4 for the 4th blade face. Labels in the diagrams are: mv is for the measured value, ov is for the optimal value, lp is for the local pitch value, mnp is for the measured section pitch value, $mmnp$ is for the measured mean section pitch value mnp , and osp is for the optimal section pitch value.

The base for blade face pitch of an optimal propeller is marked by dotted lines. They represent the new design for a propeller blade face. This paper shows the optimization of the existing blade face geometry such that all the surface irregularities of the blade face are corrected, and with it the pitch values. Accordingly, the optimal pitch values are the result of corrected irregularities on the surface of B6 ELICHE RADICE propeller blades for the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship, and not the result of propeller calculations. However, even this kind of pitch optimization gives a ship improved output performances.

The values shown for the measured results represent a mean value for local pitch for each of the 4 local blade face areas on the same radi-



Slika 5. Postupak mjerenja vijka Prop Scan tehnologijom [1]
Figure 5 Procedure for measuring a propeller using the Prop Scan technology [1]

šini vijka, a to je od $r = 0,6 \cdot R$ do $r = 0,95 \cdot R$. U tablici 5. prikazane su neke vrijednosti odstupanja uspona od trenutne linije optimalnog uspona, odnosno od trenutne linije uspona novog dizajna lica krila vijka (*design pitch*) B6 na radijusu $r = 0,95 \cdot R$ prema linearnom dijagramu na slici 6. Za trenutnu vrijednost optimalnog uspona (*design pitch*) uzeta je srednja vrijednost uspona presjeka sva 4 krila na istom radijusu (*pass pitch*). Trenutna linija optimalnog uspona se mijenja, te se formira nova, ispravna linija optimalnog uspona (*design pitch*), u pravilu nakon proračuna vijka ili kako je to već objašnjeno u poglavlju 1.

Ova odstupanja uzrokom su netočnosti u usponu. Vrijednosti odstupanja u + znače dol površine lica krila, a u – znače brijeg površine lica krila u odnosu na liniju optimalnog uspona (*design pitch*). Dol je + jer prilikom korekcije uspona površina lica krila mora rasti prema liniji optimalnog uspona, dok je brijeg – jer prilikom korekcije uspona površina lica krila mora padati prema liniji optimalnog uspona. S obzirom na vrijednosti dola i brijega, oblik i izgled presjeka lica krila je nepravilan, pa je nepravilan i rad vijka. Smanjena je iskoristivost vijka, moguće su vibracije, kao i svi ostali problemi koji su već spomenuti.

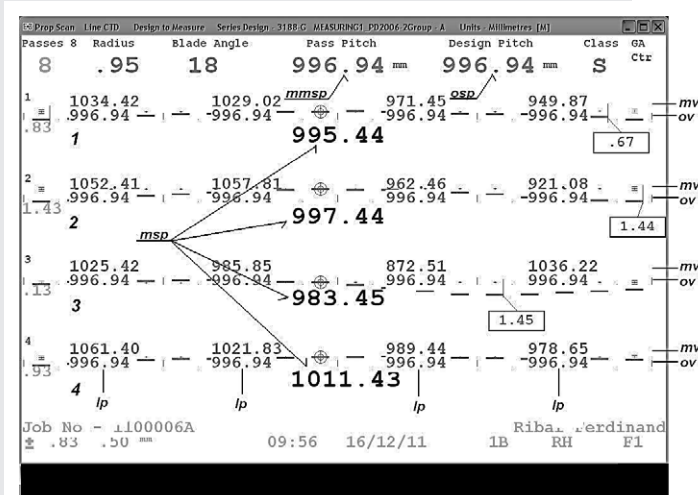
Vrijednosti odstupanja uspona (dol, brijeg) prikazane na linearnim dijagramima ne stvaraju probleme u radu vijka samo zbog odstupanja na istom presjeku jednog krila, već i više ako su

us lp . The mean pitch values for an optimal propeller *ov* and *osp* are also shown in diagrams. On the linear diagram there are the mean pitch values of blade face sections 1, 2, 3, 4 on the same radius *mosp*, as well as the mean pitch value of all 4 blades on the same radius *mmsp*. There is also the value of the blade angle φ_r for a set radius.

The initial report in the form of a linear diagram after the initial measurement of the local pitch and section pitch for blades 1, 2, 3, 4 of propeller B6 on the radius $r = 0.95 \cdot R$ is shown in Figure 6.

Linear diagrams after the initial measurements are a diagnosis or the state of the propeller prior to optimization. The greatest deviations of the blade face from the optimal one are found on the effective propeller work surface, and this is from $r = 0.6 \cdot R$ to $r = 0.95 \cdot R$. Table 5 shows some of the pitch values that deviate from the present optimal pitch, or from the present pitch line of the new B6 propeller blade face design (Design Pitch) at the radius $r = 0.95 \cdot R$ according to the linear diagram in Figure 6. For the present value of the optimal pitch (Design Pitch) the Pass Pitch value for all 4 blades on the same radius was used. The present optimal pitch line is changing, forming a new, correct optimal pitch line (Design Pitch), generally after propeller calculations or as has already been explained in Chapter 1.

These deviations are caused by pitch inaccuracies. The deviation values using + signifies the valley area of blade face, and using – signifies the cam area of the blade face in comparison to the



Slika 6. Početni izvještaj – linearni dijagram za $r = 0,95 \cdot R$
Na slici: – predstavlja liniju izmjerenih vrijednosti uspona,
• predstavlja liniju optimalnih vrijednosti uspona.

Figure 6 Initial report – linear diagram for $r = 0.95 \cdot R$

In Figure 6: – is for the measured pitch lines,
• is for the optimal pitch lines.

Tablica 5. Vrijednosti odstupanja uspona na $r = 0,95 \cdot R$

Table 5 Pitch deviation values at $r = 0.95 \cdot R$

$r = 0.95 \cdot R$		
krilo vijka propeller blade	Lokalna područja Local area	Izmjerene vrijednosti odstupanja uspona Measured pitch deviation values (mm)
1	1/4 = LE 4/4 = TE	+ 0.83 mm + 0.67 mm
2	1/4 = LE 4/4 = TE	+ 1.43 mm + 1.44 mm
3	1/4 = LE 4/4 = TE	+ 0.13 mm + 1.45 mm
4	1/4 = LE 4/4 = TE	+ 0.93 mm -

LE – ulazni brid, TE – izlazni brid
LE – leading edge, TE – trailing edge

različite na istim mjestima na svakom krilu. Ako se na konkretnom primjeru na $r = 0,95 \cdot R$ (Slika 7) promatraju ista lokalna područja svakog od 4 krila primijetit će se velika odstupanja lokalnih uspona. Ovakav vijak definitivno nema sinhronizirani rad svojih krila. Nejednolikosti lokalnih uspona na svim radijusima vijka treba svesti na minimum u skladu sa standardom Prop Scan EPS. Tek nakon toga dobit će se dobar vijak.

Dijagrami odstupanja lokalnih uspona (Slika 7) omogućuju formiranje preglednih dijagrama devijacija, diferencija i suma (Slika 8) sukladno standardu Prop Scan EPS poštivajući standard ISO 484/2. U stupčanim dijagramima prikazane su njihove srednje vrijednosti. Radi važnosti utjecaja devijacija na pravilan rad vijka dani su rezultati diferencije i sume samih devijacija. U nekim slučajevima rezultati diferencije i sume daju povoljne vrijednosti, ovisno jesu li susjedne devijacije + ili -, i ovisno kolike su im vrijednosti. Generalno, to može balansirati ili čak nivelirati odstupanja uspona od optimalnog, ako se promatra s razine srednje vrijednosti uspona, što može rezultirati povoljnijem radu vijka. Pri likom optimizacije vijka vrijednosti devijacije, diferencije i sume treba držati unutar dopuštenih ISO 484/2 tolerancija za klasu točnosti vijka na koju se vijak optimizira.

Prema dijagramima prikazanim na prethodnim slikama te prema dijagramu sa slike 9. proizlaze sljedeći zaključci o stanju vijka prije optimizacije:

- srednje vrijednosti lokalnih uspona su 54,6% unutar zadanih tolerancija za klasu S
- srednje vrijednosti uspona presjeka su 98,3% unutar zadanih tolerancija za klasu S
- srednje vrijednost uspona krila su 100% unutar zadanih tolerancija za klasu S.

Potrebno je izvršiti korekciju uspona na način da sve promatrane vrijednosti budu unutar granica dopuštenih tolerancija za klasu S. Teži se da srednje vrijednosti lokalnih uspona i uspona presjeka budu jednake na svim radijusima.

4.2. Završno ispitivanje i dijagnostika vijka

Rezultati mjerenja vijka tipa B6 Eliche Radiće ribarskog broda "Majka Marija" nakon optimizacije, prikazani su kao završni izvještaji u obliku linearnih i stupčanih dijagrama. Završni

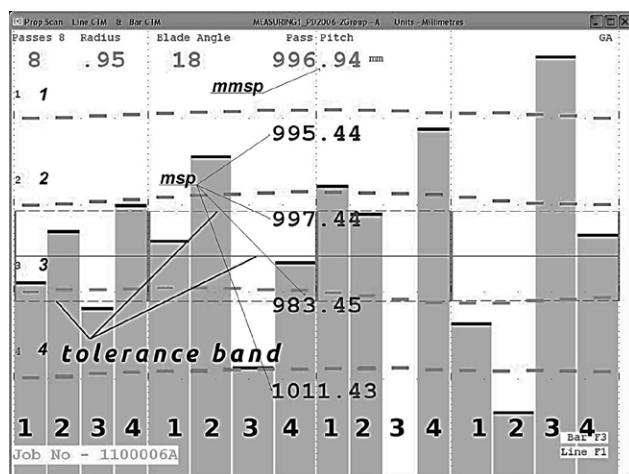
line of optimal pitch (Design Pitch). The valley is + as during the pitch correction the blade face area has to increase towards the optimal pitch line, while the cam is - as during the pitch correction the blade face area has to drop towards the optimal pitch line. Considering the valley and cam values, the form and appearance of the blade face section is irregular, so that the propeller works with irregularity. The propeller efficiency decreases, vibrations are possible, as well as all the other problems already mentioned.

The pitch deviation values (valley, cam) shown in the linear diagrams do not create problems in the propeller movement only due to the deviation at the same section of a one blade, but more so if they vary in the same places on each blade. If, using a specific example $r = 0.95 \cdot R$ (Figure 7), the same local areas for each of the 4-blade are observed, great deviations in the local pitch can be noticed. The blades of such a propeller definitely do not work in synchronization. The irregularities of the local pitch at all propeller radii must be kept to a minimum in line with the Prop Scan EPS standard. Only after this can you get a good propeller.

The deviation diagrams for the local pitch (Figure 7) enable the formation of easily-read diagrams for deviations, differences and sums (Figure 8), in accordance with the Prop Scan EPS standard, keeping in line with the ISO 484/2 standard. The bar diagrams show their mean values. Due to the importance of how deviation affects the correct operation of propellers, differences and the sum of the total results of the deviation are given. In some cases the differences and sum results give satisfactory values, depending on whether they are neighbouring deviations + or - and depending on their values. Generally, this can balance or even level out the pitch discrepancies from the optimal one, if viewed from the mean pitch value level, which can result in more favourable propeller results. During the propeller optimization, the deviation, differences and sum values must be contained within the limits of the ISO 484/2 tolerances for propeller accuracy classes.

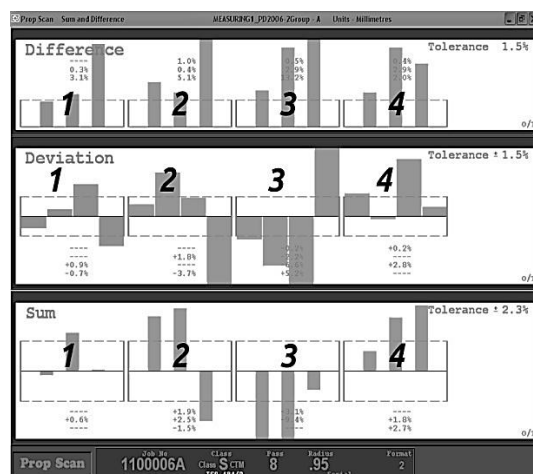
According to the diagrams shown in the previous figures, and according to the diagram in Figure 9, the following can be concluded regarding the state of the propeller before optimization:

- mean local pitch values are 54.6% within default tolerances for class S,
- mean section pitch values are 98.3% within default tolerances for class S, and
- mean blade pitch values are 100% within default tolerances for class S.



Slika 7. Dijagram odstupanja lokalnih uspona svih krila na $r = 0,95 \cdot R$ prije optimizacije

Figure 7 Deviation diagram of local pitch for all blades at $r = 0,95 \cdot R$ before optimization



Slika 8. Dijagram devijacije, diferencije i sume na $r = 0,95 \cdot R$ prije optimizacije

Figure 8 Deviation, differences and sum diagram at $r = 0,95 \cdot R$ before optimization

izvještaj u obliku linearnog dijagrama nakon završnog mjerenja lokalnog uspona i uspona presjeka krila 1, 2, 3, 4 vijka B6 na radijusu prikazan je $r = 0,95 \cdot R$ na slici 10.

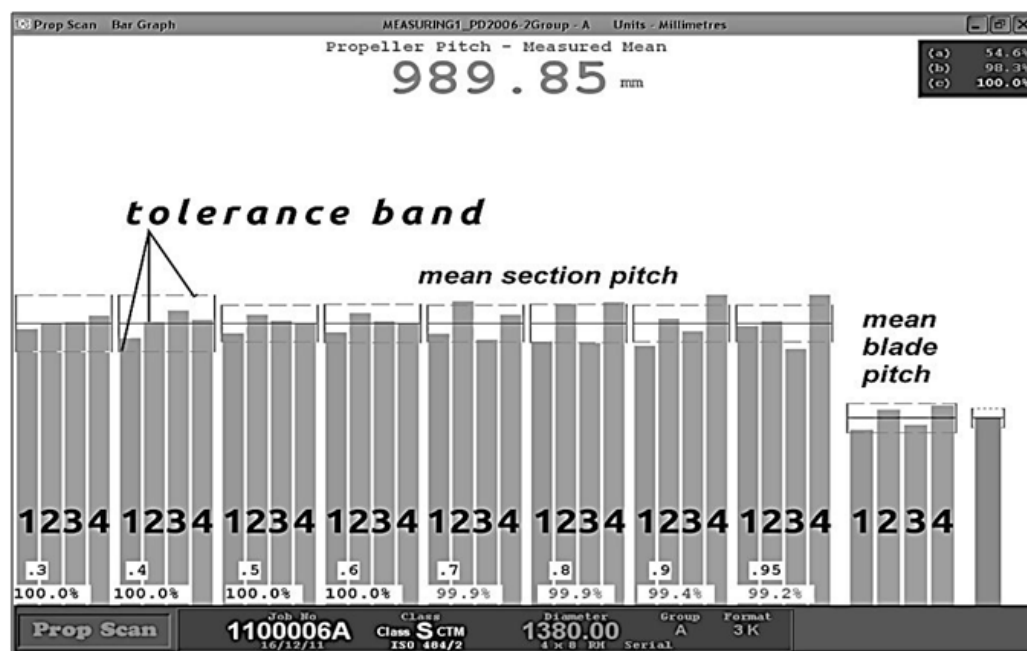
Na linearnim dijagramima završnog mjerenja vidi se da linije korigiranog uspona dobro prate linije optimalnog uspona. Korigirane vrijednosti uspona nakon optimizacije su u granicama klase točnosti vijka S prema standardu ISO 484/2.

Prema rezultatima mjerenja koji su prikazani na lineranom dijagramu za $r = 0,95 \cdot R$ (Slika 10)

The pitch correction must be carried out so that all the examined values are within the allowed tolerance limits for class S. The objective is to achieve equal mean values for local pitches and section pitches at all radii.

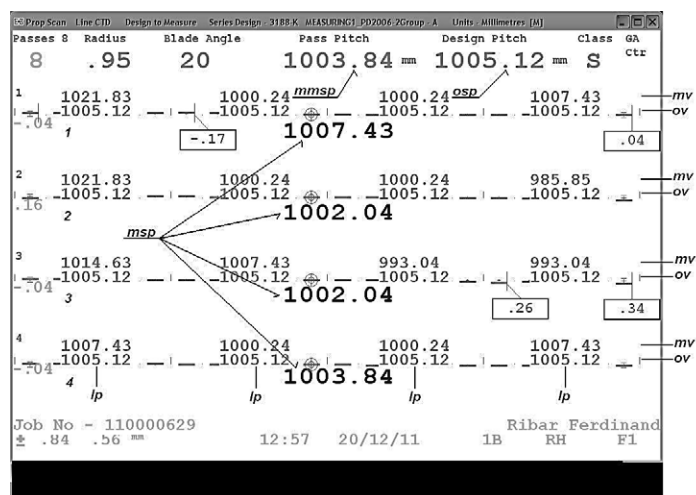
4.2 Final Testing and Diagnosis of the Propeller

The measurement results, after optimization, for the propeller type B6 ELICHE RADICE on the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship, are shown as a final report in the form



Slika 9. Stanje vijka prije optimizacije – Početni izvještaj

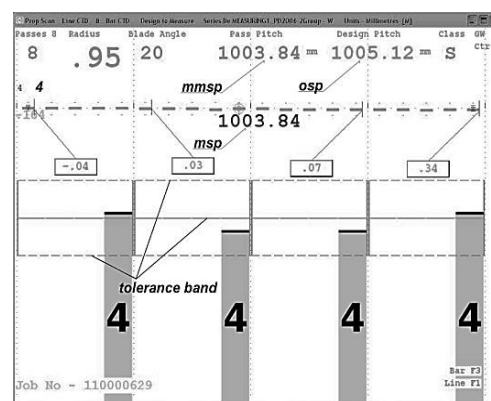
Figure 9 The propeller state before optimization – INITIAL REPORT



Slika 10. Završni izvještaj – linearni dijagram za $r = 0,95 \cdot R$
Na slici: – predstavlja liniju izmjerenih vrijednosti uspona,
· predstavlja liniju optimalnih vrijednosti uspona.

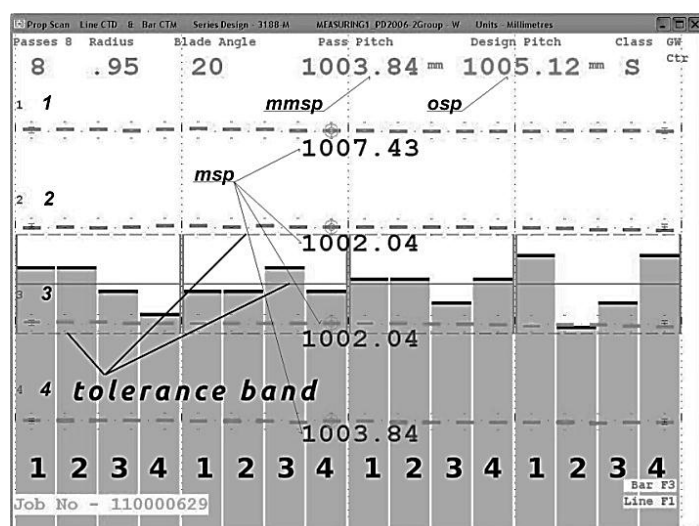
Figure 10 Final report – linear diagram at $r = 0,95 \cdot R$

In Figure 10: – is for the measured pitch lines,
· is for the optimal pitch lines.



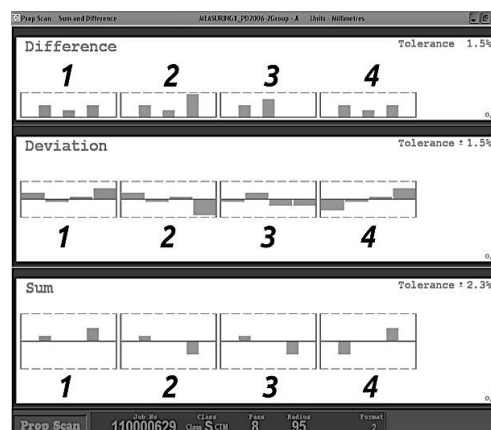
Slika 11. Dijagram odstupanja lokalnih uspona krila 4 na $r = 0,95 \cdot R$ nakon optimizacije

Figure 11 Deviation diagram of local pitch for blade 4 at $r = 0,95 \cdot R$ after optimization



Slika 12. Dijagram odstupanja lokalnih uspona svih krila na $r = 0,95 \cdot R$ nakon optimizacije

Figure 12 Deviation diagram of local pitch for all blades at $r = 0,95 \cdot R$ after optimization



Slika 13. Dijagram devijacije, diferencije i sume na $r = 0,95 \cdot R$ nakon optimizacije

Figure 13 Deviation, differences and sum diagram, at $r = 0,95 \cdot R$ after optimization

nastaju stupčani dijagrami odstupanja lokalnih uspona krila 1, 2, 3 i 4 (Slika 11) u odnosu na područje tolerancije (tolerance band– isprekidani pravokutnici) i na liniju optimalnog uspona (design pitch), za klasu točnosti S, na koju je optimiziran vijak sukladno standardu ISO 484/2. Pomicanjem gore/dolje područja tolerancije (tolerance band) unutar dopuštene tolerancije od $\pm 1,5\%$ za devijaciju, izmjerene srednje vrijednosti lokalnih uspona za ista lokalna područja krila 1, 2, 3 i 4 smještaju se unutar područja tolerancije za klasu S. Tada nastaje zajednički dija-

of linear and bar diagrams. The final report in the form of linear diagrams after the final measurement of the local pitch and section pitch for B6 propeller blades 1, 2, 3, 4 at the radius $r = 0,95 \cdot R$ is shown in Figure 10.

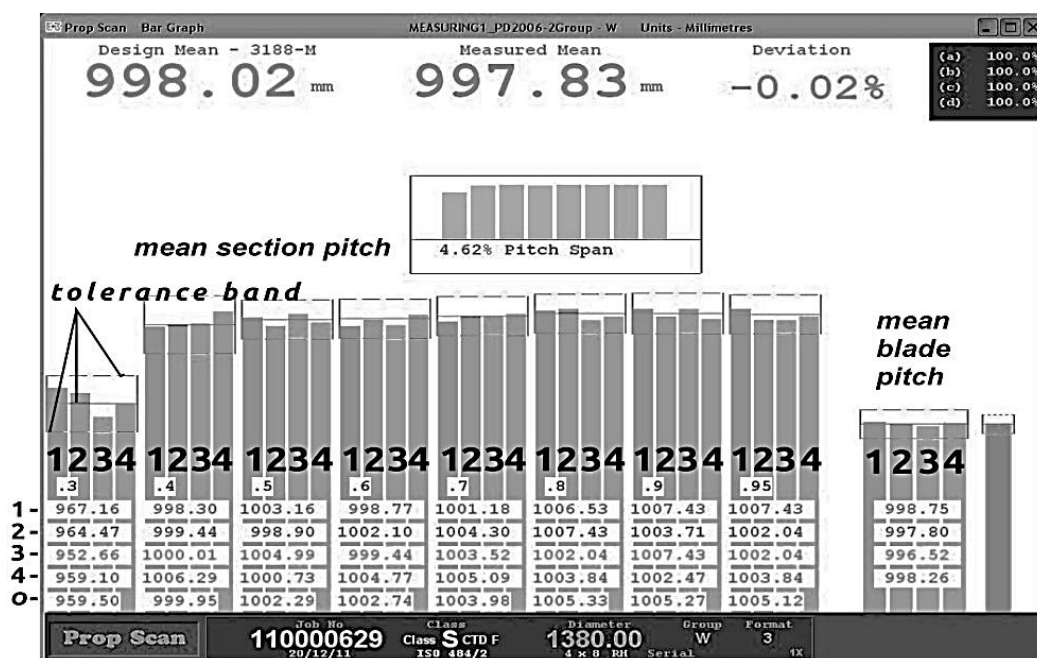
The linear diagrams of the final measurement show that the lines of the corrected pitch follow the lines of the optimal pitch well. The corrected pitch values after optimization are within the limits for propeller accuracy class S according to the ISO 484/2 standard.

gram odstupanja srednjih vrijednosti lokalnih uspona za ista lokalna područja krila 1, 2, 3 i 4 na $r = 0,95 \cdot R$ (Slika 12) u odnosu na dopušteno područje tolerancije za klasu S. Ovo je vrlo bitan dijagram, jer pokazuje da su lokalni usponi istih lokalnih područja krila 1, 2, 3 i 4 na promatranom radijusu unutar dopuštenog područja tolerancije za navedenu klasu optimizacije vijka, što je je garancija dobro optimiziranog vijka. I na kraju, iz dijagrama prikazanog na slici 12. nastaje dijagram devijacije, diferencije i sume na $r = 0,95 \cdot R$ nakon optimizacije, za sva četiri krila posebno (Slika 13). Da je vijak uspješno optimiziran vidi se iz dijagrama na slici 13. gdje su vrijednosti devijacije, diferencije i sume unutar granica dopuštenih tolerancija za klasu S.

Prema dijagramima prikazanim na prethodnim slikama, te prema dijagramu sa slike 14. proizlaze sljedeći zaključci o stanju vijka nakon optimizacije:

- 100.0% – srednje vrijednosti lokalnih uspona su unutar zadanih tolerancija za klasu S
- 100.0% – srednje vrijednosti uspona presjeka su unutar zadanih tolerancija za klasu S
- 100.0% – srednje vrijednost uspona krila su unutar zadanih tolerancija za klasu S

According to the measurement results shown in the linear diagram at $r = 0.95 \cdot R$ (Figure 10), bar diagrams appear showing the local pitch deviation for blades 1, 2, 3 and 4 (Figure 11) in relation to the area of tolerance (tolerance band - shaped as discontinuous rectangles) and at the line of optimal pitch (Design Pitch), for the accuracy class S, at which the optimized propeller meets the ISO 484/2 standard. By moving the tolerance band up/down within the allowed tolerances from $\pm 1.5\%$ for deviation, the measured mean values of the local pitch for the same local area for blades 1, 2, 3 i 4 are found within the tolerance band for class S. This is when a joint deviation diagram of mean local pitch values appears for the same local area of blades 1, 2, 3 and 4 at $r = 0.95 \cdot R$ (Figure 12) in comparison to the allowed and adjusted tolerance band for class S. This is a very important diagram, as it shows that the local pitch of the same local areas for blades 1, 2, 3 and 4 at the examined radius within the allowed tolerance band for the mentioned propeller optimization class. This is a guarantee for a well-optimized propeller. And finally, a deviation, difference and sum diagram at $r = 0.95 \cdot R$ after optimization results from the diagram shown in Figure 12, separately for all four blades (Figure 13). The successful optimization of the propeller shows the values of the deviation, difference



Slika 14. Stanje vijka nakon optimizacije – Završni izvještaj

Na slici: o – je za vrijednost optimalnog uspona presjeka.

Figure 14 The propeller state after optimization – FINAL REPORT

In Figure 14: o – is for the optimal section pitch value.

d) 100.0% – postignuta je linija dizajna za klasu S.

Odstupanje korigiranog uspona (*measured mean*) u odnosu na optimalni uspon (*design mean*) je – 0,02%. Prikazana je i vrijednost redukcije uspona (smanjenje uspona na glavini) optimiziranog vijka na $r = 0.3 \cdot R$ od 4,62%.

4.3. Usporedba geometrijskih značajki vijka prije i nakon optimizacije vijka

Najvažnije geometrijske značajke vijka Eliche Radice B6 ribarskog broda “Majka Marija” prije i nakon optimizacije, prikazane su u tablici 6. Dane su i izračunate vrijednosti kuta uspona θ_r [6].

4.4. Usporedba izlaznih performansi broda prije i nakon optimizacije vijka

U tablici 7. dani su rezultati mjerenja izlaznih performansi ribarskog broda “Majka Marija” prije i nakon optimizacije vijka Eliche Radice B6. Prikazani su rezultati mjerenja za najčešće brojeve okretaja dizelskog motora s kojima se plovilo, $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ i $n = 1200 \text{ min}^{-1}$. Prosječan potrošak goriva B (kg/h) dan je za otežane režime plovidbe ribarskog broda: tegljenje, kočarenje, plovidba s punim skladišti-

es and sum in Figure 13 within the allowed tolerance limits for class S.

According to the diagrams shown in the previous Figures, and according to the diagram in Figure 14, the following can be concluded regarding the state of the propeller after optimization:

- 100.0% – mean local pitch values are within default tolerances for class S,
- 100.0% – mean section pitch values are within default tolerances for class S,
- 100.0% – mean blade pitch values are within default tolerances for class S, and
- 100.0% – a linear design is achieved for class S.

The deviation from the measured mean as compared to the design mean is - 0.02%. The reduction pitch values (reduction of pitch on the hub) of an optimized propeller at $r = 0.3 \cdot R$ of 4.62% are also shown.

4.3 Comparison of Geometric Propeller Characteristics before and after Propeller Optimization

The most important geometric characteristics of the ELICHE RADICE B6 propeller for the “Majka Marija (‘Mother Mary’)” fishing ship before and after propeller optimization

Tablica 6. Geometrijske značajke vijka B6 prije i nakon optimizacije

Table 6 Geometric characteristics of the B6 propeller before and after optimization

radijus r <i>radius r</i>	PRIJE OPTIMIZACIJE <i>BEFORE OPTIMIZATION</i>			NAKON OPTIMIZACIJE <i>AFTER OPTIMIZATION</i>		
	Srednja vrijednost uspona presjeka P_r (mm) <i>Mean section pitch value P_r</i>	Kut krila φ_r Blade Angle <i>Blade angle φ_r</i>	Kut uspona θ_r <i>Pitch angle θ_r</i>	Srednja vrijednost uspona presjeka P_r (mm) <i>Mean section pitch value P_r</i>	Kut krila φ_r Blade Angle <i>Blade angle φ_r</i>	Kut uspona θ_r <i>Pitch angle θ_r</i>
0.3·R	956.60 mm	66°	36.348°	960.85 mm	67°	36.469°
0.5·R	1001.23 mm	58°	24.802°	1001.94 mm	59°	24.818°
0.6·R	999.94 mm	54°	21.036°	1001.27 mm	54°	21.062°
0.7·R	990.40 mm	47°	18.082°	1003.52 mm	46°	18.306°
0.9·R	988.20 mm	29°	14.219°	1005.26 mm	29°	14.454°
0.95·R	996.94 mm	18°	13.613°	1003.84 mm	20°	13.704°
	Srednji uspon vijka prije optimizacije: <i>Mean propeller pitch before optimization:</i> $P = P_{r(i)} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{r(i)}}{N} = 989.85 \text{ mm}$			Srednji uspon vijka nakon optimizacije: <i>Mean propeller pitch after optimization:</i> $P = P_{r(i)} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{r(i)}}{N} = 997.83 \text{ mm}$		
D (mm)	1380 mm			1380 mm		
P/D	0.717			0.723		

Tablica 7. Rezultati mjerenja izlaznih performansi prije i nakon optimizacije vijka B6**Table 7** Results of measuring output performances before and after the optimization of propeller B6

Dizelski motor WM 1312 H Broj okretaja dizelskog motora n (min^{-1}) <i>Diesel engine</i> WM 1312 H <i>No. of diesel</i> <i>engine revolutions</i> n (min^{-1})	PRIJE OPTIMIZACIJE <i>BEFORE OPTIMIZATION</i>			NAKON OPTIMIZACIJE <i>AFTER OPTIMIZATION</i>		
	Brzina broda u tegljenju, kočarenju v (čv) <i>Ship speed in</i> <i>towing and</i> <i>trawling</i> v (<i>kts</i>)	Brzina broda u slobodnoj plovidbi v (čv) <i>Ship speed in</i> <i>free sailing</i> v (<i>kts</i>)	Prosječan potrošak goriva B (kg/h) <i>Average fuel</i> <i>consumption</i> B (kg/h)	Brzina broda u tegljenju, kočarenju v (čv) <i>Ship speed in</i> <i>towing and</i> <i>trawling</i> v (<i>kts</i>)	Brzina broda u slobodnoj plovidbi v (čv) <i>Ship speed in</i> <i>free sailing</i> v (<i>kts</i>)	Prosječan potrošak goriva B (kg/h) <i>Average fuel</i> <i>consumption</i> B (kg/h)
1100	2.3	7.2	21.431 l/h 18.729 kg/h	2.8	7.9	21.15 l/h 18.485 kg/h
1200	2.4	7.3 – 7.5		3.0	8.2 – 8.3	22.21 l/h 19.411 kg/h

Tablica 8. Poboljšanja izlaznih performansi ribarskog broda “Majka Marija”**Table 8** Improving the output performance of the fishing ship “Majka Marija” (“Mother Mary”)

Pogonski stroj Dizelski motor <i>Diesel propulsion engine</i> WM 1312 H	Broj okretaja dizelskog motora n (min^{-1}) <i>No. of</i> <i>diesel engine</i> <i>revolutions</i> n (min^{-1})	Prosječan potrošak goriva B (kg/h) <i>Average fuel</i> <i>consumption</i> B (kg/h)	Brzina broda u tegljenju, kočarenju v (čv) <i>Ship speed in</i> <i>towing and</i> <i>trawling</i> v (<i>kts</i>)	Brzina broda u slobodnoj plovidbi v (čv) <i>Ship speed in</i> <i>free sailing</i> v (<i>kts</i>)
Prije optimizacije vijka <i>Before propeller</i> <i>optimization</i>	1100 $n = 61.1\% n_{nom}$	18.729 kg/h	2.3	7.2
Nakon optimizacije vijka <i>After propeller</i> <i>optimization</i>	1100 $n = 61.1\% n_{nom}$	18.485 kg/h	2.8	7.9
Poboljšanja <i>Improvements</i>		ista potrošnja <i>Same</i> <i>consumption</i>	+ 0.5 čv	+ 0.7 čv

ma, pod teretom..., što odgovara radnoj karakteristici teškog vijka prema dijagramu apsorpcije vijka (P_B/n).

Optimizacijom vijka Eliche Radice B6 s klase II. na klasu S sukladno standardu ISO 484 postignuta su poboljšanja izlaznih performansi ribarskog broda “Majka Marija”. U tablici 8. prikazana su navedena poboljšanja za $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ dizelskog motora.

are shown in Table 6. The calculations for the pitch angle values are also given θ_r [6].

4.4 Comparison of the Ship's Output Performances before and after Propeller Optimization

Table 7 gives the results of measuring output performances on board the “Majka Marija” (“Mother Mary”) fishing ship before and after the propeller optimization of the ELICHE RADICE B6. The measurement results are shown, with the most frequent number of diesel engine revolutions during sailing, $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ and $n = 1200 \text{ min}^{-1}$. The average fuel con-

5. ZAKLJUČAK

Provedena mjerenja i analiza s usporedbom izlaznih performansi broda prije i nakon optimizacije vijka, potvrđuju uspješno izveden postupak optimizacije brodskog vijka s konstantnim usponom i opravdanost izvođenja primjenjene Prop Scan tehnologije. Može se zaključiti, kako za gotovo istu potrošnju goriva B (kg/h), pri istom broju okretaja dizelskog motora $n = 1100 \text{ min}^{-1}$, srednje povećanje brzine ribarskog broda "Majka Marija", nakon optimizacije vijka Eliche Radice B6 s klase II. na klasu S, iznosi 15,66%. Pri tome su vibracije koje su prije optimizacije bile prilično izražene, smanjene na minimum. Ista brzina ovoga ribarskog broda sada se postiže s manjim brojevima okretaja dizelskog motora. Dizelski motor je pravilno opterećen. Radna karakteristika vijka odmiče se od područja teškog vijka. Smanjena je potrošnja goriva, pa sam postupak optimizacije ima i svoju ekonomsku opravdanost.

Ovim radom pokazano je da optimizacija vijka postupkom izjednačavanja vrijednosti uspona pridonosi rješavanju problematike radne karakteristike optimalnog vijka. Također je pokazano kako smanjenje otpora vijka poboljšava stupanj iskoristivosti vijka η_0 . Vijak u eksploataciji mora biti bez obraslina, a površina lica krila mora biti glatka. Potvrđena je sinteza tehnološkog postupka održavanja brodskog vijka s prikazanom optimizacijom.

sumption B (kg/h) is given for the difficult sailing regimes on a fisherman's ship: towing, trawling, sailing with full storage, under cargo, etc, which matches the work characteristics of a heavy propeller according to the propeller absorption diagram (P_B/n).

The optimization of the ELICHE RADICE B6 propeller from class II to class S in accordance with the ISO 484 standards, achieved the improvement of output performances on the fishing ship "Majka Marija" ("Mother Mary"). Table 8 shows the mentioned improvements for $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ of a diesel engine.

5 CONCLUSION

The measurements and analyses carried out, in comparison to the output performances of the ship before and after the propeller optimization, demonstrates a successful procedure for the optimization of a marine propeller with constant pitch and the justification for applying the Prop Scan technology. It can be concluded that almost the same fuel consumption B (kg/h) for the same number of diesel engine revolutions $n = 1100 \text{ min}^{-1}$, at an average increase in speed for the "Majka Marija" ("Mother Mary") fishing ship, and after the optimization of the ELICHE RADICE B6 propeller from class II to class S, amounts to 15.66%. Furthermore, the vibrations that were quite pronounced before the optimization were lowered to a minimum. This fishing ship has achieved the same speed with a lower number of diesel engine revolutions. The diesel engine is correctly loaded. The propeller work characteristics move away from the area of heavy propellers. Fuel consumption is lowered, so that the optimization procedure itself has its economic justification.

This paper has shown that the propeller optimization procedure, by equalizing out the pitch values, contributes towards resolving issues on the optimal propeller work characteristics. What is also shown is how lowering propeller resistance improves the level of the propeller efficiency η_0 . In exploitation, the propeller must be without protrusions, and the blade faces must be smooth. The synthesis of using technological procedures for the maintenance of a marine propeller with the indicated optimization has been confirmed.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Adriatic Propeleri Zadar, *Prop Scan – Marine Propeller Technology: Rezultati mjerenja*, Zadar, 2012.
- [2] Antić, R., *Fault Tolerant Control System for Large Diesel Engine in Marine Propulsion*, Ph.D. dissertation, Faculty of Electric Engineering and Computing, University of Zagreb, 2002.
- [3] Gerr, D., *Propeller Handbook – The Complete Reference for Choosing, Installing and Understanding Boat Propellers*, International Marine USA, 2001.
- [4] Lammeren, W. P. A. van, *Otpor i propulzija brodova*, Zagreb, Brodarski institut Zagreb, 1952.
- [5] Propeller Dynamics Pty. Ltd., *Advanced Propeller Course, Prop Scan – Marine Propeller Technology*, Australia, 2011.
- [6] Radan, D., *Uvod u hidrodinamiku broda*, Dubrovnik, Sveučilište u Dubrovniku, 2004.
- [7] Sentić, A., M. Fancev, *Problemi otpora i propulzije brodova*, Zagreb, Brodogradnja Zagreb, 1956.
- [8] *Podaci za ribarski brod "Majka Marija"*, Šibenik, 2002.
- [9] *Podaci za brzohodni dizelski motor tipa WM 1312 H, WM Stabilimenti meccanici VM S.p.A.*, Assistenza Tecnica.
- [10] *Podaci za brodski vijak Eliche Radice tipa B6*, www.propellersradice.com, 2012.